

## ÎNCERCĂRI DE OBOSEALĂ LA ÎNCOVOIERE. DIAGRAMA WÖHLER

### 1. Scopul lucrării

Determinarea experimentală a limitei de rezistență la oboseală. Trasarea diagramei Wöhler.

### 2. Elemente teoretice

#### 2.1. Cicluri de solicitări variabile

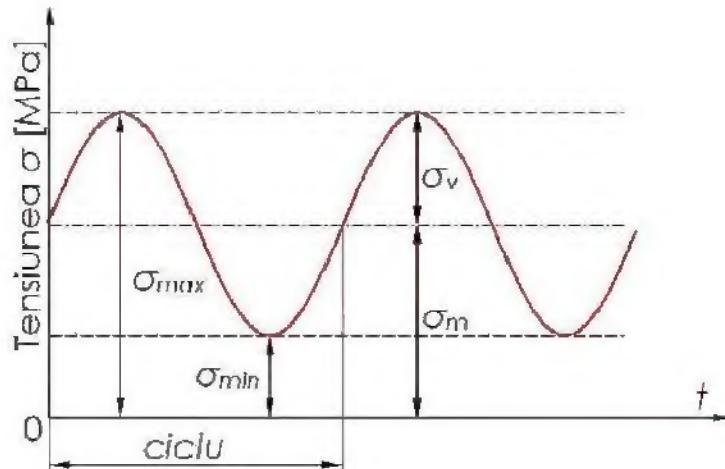
Un ciclul de solicitare variabilă, figura 1, este definit prin următoarele mărimi, [1], [2]:

– tensiunea maximă  $\sigma_{\max}$  și tensiunea minimă  $\sigma_{\min}$  – se determină cu relațiile din „Rezistența materialelor”;

$$- \text{tensiunea medie} \quad \sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (1)$$

$$- \text{amplitudinea tensiunii} \quad \sigma_v = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (2)$$

$$- \text{caracteristica ciclului (coeficient de simetrie)} \quad R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (3)$$



**Fig. 1** Mărimi definitorii pentru solicitarea variabilă

Dacă tensiunile variază între aceleași valori  $\sigma_{\min}$  și  $\sigma_{\max}$  pe toată durata de aplicare a solicitării variabile ciclul se numește staționar.

După valorile și semnele algebrice pe care le au limitele  $\sigma_{\min}$  și  $\sigma_{\max}$ , respectiv coeficientul de asimetrie  $R$ , există următoarele tipuri de cicluri:

- ciclul alternant-simetric caracterizat prin:

$$R = -1; \sigma_{\max} = -\sigma_{\min}; \sigma_m = 0; \sigma_v = \sigma_{\max};$$

- ciclul asimetric la care  $R \neq -1$ . Acesta se numește ciclu oscilant dacă tensiunile rămân de același semn (poate fi pozitiv sau negativ), iar cazul particular când una din valorile extreme ale tensiunii este zero poartă denumirea de ciclu pulsant. Ciclul pulsant pozitiv are caracteristica  $R = 0$ ;

- ciclul static este un caz particular de solicitare variabilă cu  $R = +1$ .

Solicitările variabile, indiferent de tipul ciclului, determină apariția fenomenului de oboseală a materialului, care reprezintă cea mai frecventă cauză de deteriorare și ieșire din funcțiune a organelor de mașini. Ruperea prin oboseală se produce după un anumit număr de cicluri pentru tensiuni mai mici decât tensiunile care produc deteriorarea prin rupere statică. În funcție de răspunsul (comportarea) metalului la solicitarea variabilă periodică se deosebesc două situații, [3].

Oboseala în domeniul durabilităților mari (peste  $10^6$  cicluri de solicitare) se dezvoltă în condițiile unor solicitări variabile la care tensiunea maximă și amplitudinea tensiunii au valori mici comparativ cu caracteristicile statice de rezistență ale metalului, iar deformațiile metalului solicitat sunt în domeniul elastic.

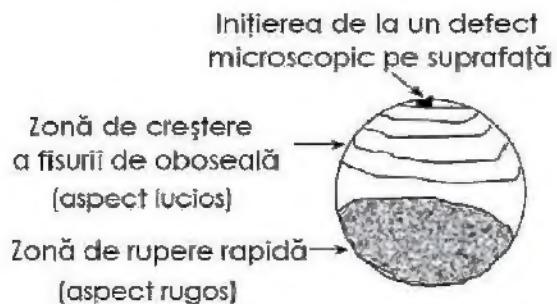
Oboseala în domeniul durabilităților mici rezultă în condițiile unor solicitări variabile cu vârfuri și amplitudini de tensiune de valori mari care determină deformații locale elasto-plastice.

## 2.2. Ruperea prin oboseală

Fenomenul fizic al ruperii prin oboseală este complex și diferit de cel al ruperii la solicitări statice. Ruperea prin oboseală nu se produce brusc în întreaga secțiune a unei piese, ci parurge trei etape (stadii) principale reprezentate în figura 2:

- inițierea fisurii are loc în zona unui concentrator (geometric, rugozitate, de material) care perturbă omogenitatea câmpului de tensiune determinând modificarea stării de tensiune (distribuția reală prezintă vârfuri de tensiune);

- propagarea microfisurii are loc continuu datorită condițiilor favorabile de evoluție a microfisurilor și de coalescența lor în macrofisuri;



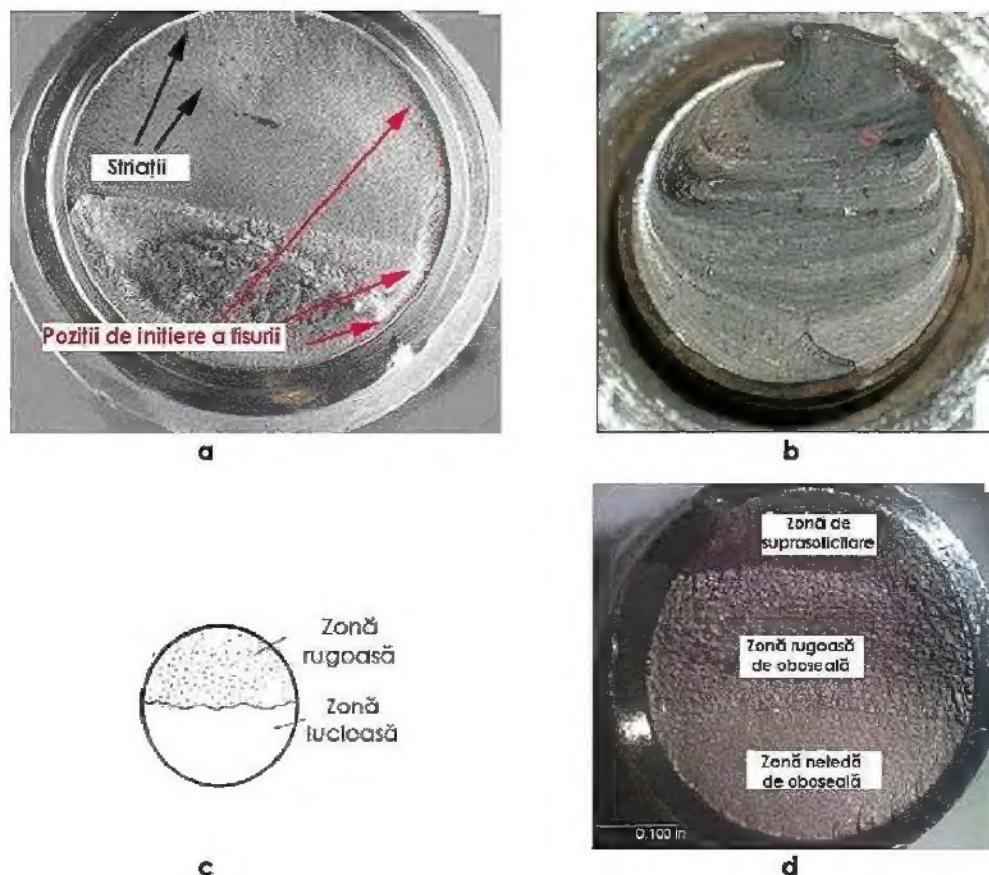
**Fig. 2 Stadiile dezvoltării deteriorării prin oboseală**

– ruperea finală are loc la atingerea dimensiunii critice de către una dintre fisuri, când se declanșează o rupere fragilă prin suprasolicitarea materialului din secțiunea rămasă.

Apariția și dezvoltarea fisurii de oboseală pot fi evidențiate în secțiunea de rupere a unei piese, figura 3 și figura 4 în care se indică și zona de inițiere a fisurii de oboseală. Se observă două zone de oboseală care se propagă pe aproximativ 33 % din suprafața de rupere înainte de suprasolicitarea de torsiune, iar în zona 2 apar urme de oboseală și oxidare.



**Fig. 4 Suprafața tipică de rupere prin oboseală**



**Fig. 5 Aspectul secțiunii de rupere prin oboseală**

Ruptura prin oboseală a metalelor tenace are un aspect caracteristic, ca în figura 5, care permite să fie ușor identificată:

- tensiunea variabilă având amplitudini relativ mici, nu determină deformații plastice accentuate (fără gătuirea ce precede ruperea statică), iar metalul se rupe similar celui fragil (figura 5.a);
- adeseori fisura de oboseală nu se propagă continuu, cu aceeași viteză, ci cu intermitențe (datorită perioadelor de oprire a mașinii sau de solicitare redusă care fac ca fisura să nu avanseze) cum arată figura 5.b;
- în secțiunea piesei apar două sau trei zone distincte (figura 5.c, 5.d): una lucioasă (netedă) – datorită frecării materialului în timpul dezvoltării fisurii și una grăunțoasă (ruguoasă) în partea în care are loc ruptura finală.

Figura 6 exemplifică organe de mașini cu distrugeri prin oboseală.



**Fig. 6** Exemple de rupere prin oboseală:  
a – arbore, b – ax de turbină, c – șurub, d – bielă, e – arbore cotit

### 2.3. Evaluarea comportării la oboseală

Principala metodă de evaluare a comportării la oboseală a materialelor o constituie încercarea pe epruvete netede la solicitări ciclice, de regulă alternant-simetrice, cu amplitudine constantă (Wöhler).

Forma și dimensiunile epruvetelor utilizate la încercările de oboseală sunt reprezentate în figura 7.

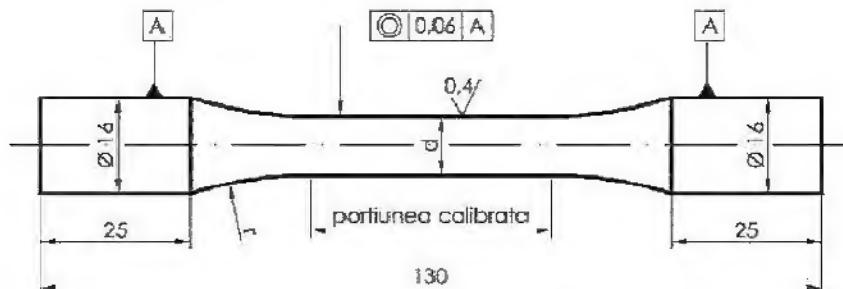


Fig. 7 Forma constructivă a epruvetei

Spre deosebire de caracteristicile de rezistență statică, care au valori bine determinate, orice material are o infinitate de rezistențe la oboseală, după valoarea coeficientului  $R$  de simetrie a ciclului și după tipul de solicitare ( $\sigma_{RN}$  sau  $\tau_{RN}$ ), dependente de numărul de cicluri de solicitare.

Prin reprezentarea grafică a numărului  $N$  de cicluri de solicitare și rezistență la oboseală  $\sigma_{RN}$  corespunzătoare, se obține curba caracteristică de oboseală sau curba Wöhler, figura 8.

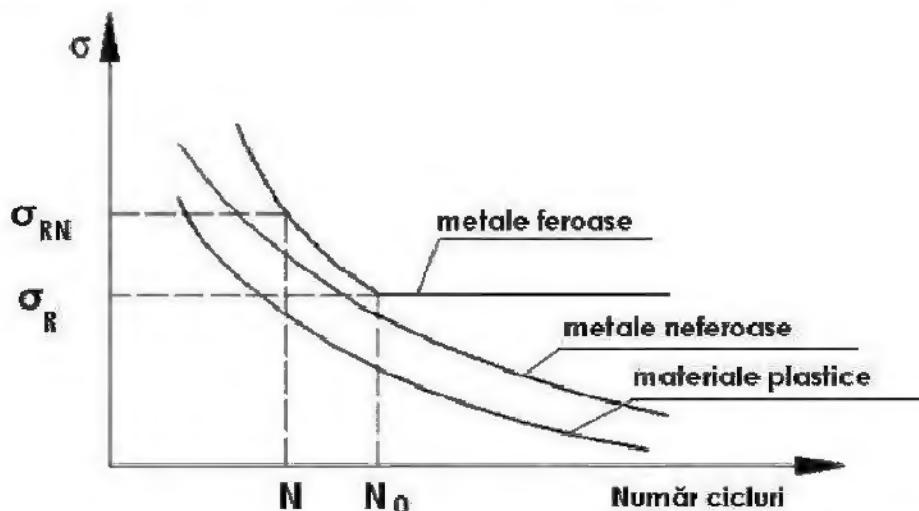


Fig. 8 Curba caracteristică Wöhler (de durabilitate la oboseală)

În forma tradițională, tensiunile sunt reprezentate la scară liniară, iar durabilitățile N la scară logaritmică (sistem de coordonate semilogaritmice). Dependența dintre rezistență la oboseală și numărul de cicluri de solicitare se poate exprima analitic astfel:

- la materiale feroase:

- scădere exponențială după relația:

$$\sigma_{RN} = \sigma_R \cdot \left( \frac{N_0}{N} \right)^{1/m} \quad \text{pentru } N < N_0 \quad (4)$$

$$- \text{ palier orizontal} \quad \sigma_{RN} = \sigma_R \quad \text{pentru } N \geq N_0 \quad (5)$$

unde  $N_0$  reprezintă numărul de cicluri de bază stabilit convențional;

- la materiale neferoase și plastice - sub formă exponențială dată de relația (4) fără existența palierului.

Tensiunea maximă pe care o epruvetă supusă unei solicitări variabile cu caracteristica R, în condiții ideale de încercare, o poate suporta fără apariția fenomenului de deteriorare prin oboseală se numește limită de rezistență la oboseală (fatigue limit, limite de fatigue, Ermüdungsfestigkeit, предел усталости) a materialului epruvei pentru solicitarea în cauză.

Limita de rezistență la oboseală are notația standard  $\sigma_R$ , ( $\tau_R$ ) și este dependentă de material, tipul solicitării și forma geometrică, valori pentru câteva oțeluri fiind date în tabelul 1, [3].

**Tabelul 1** Caracteristici de rezistență la oțeluri

Marca oțelului	Tratamentul termic	$R_m$ N/mm <sup>2</sup>	$R_{p0.2}$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_{-1}$ N/mm <sup>2</sup>
<b>1C35</b> (OLC 35)	Normalizare	511 - 594	310 - 383	269 - 308
	Îmbunătățire	604 - 882	475 - 772	337 - 431
<b>1C45</b> (OLC 45)	Normalizare	608 - 680	348 - 409	279 - 343
	Îmbunătățire	672 - 852	441 - 660	350 - 431
<b>1C60</b> (OLC 60)	Normalizare	687 - 748	360 - 445	308 - 333
	Îmbunătățire	712 - 937	521 - 663	392 - 450

Întrucât determinarea experimentală a limitei de rezistență la oboseală este o operație laborioasă există relații aproximative de apreciere a valorilor acestaia. Pentru oțel carbon, [2]:

$$\sigma_{-1f} = 0,315 \cdot R_m \quad (6)$$

$$\sigma_{0f} = (1,5 \dots 1,8) \cdot \sigma_{-1f} \quad (7)$$

$$\sigma_{-1,\min} = 0,44 \cdot R_m \quad (8)$$

$$\sigma_{-1,\max} = \frac{R_m + R_{p0.2}}{4} + 50 \quad (9)$$

$$\sigma_0 = (1,6 \dots 1,8) \cdot \sigma_{-1} \quad (10)$$

$$\tau_{-1} = (0,55 \dots 0,58) \cdot \sigma_{-1} \quad (11)$$

$$\tau_0 = (1,8 \dots 2) \cdot \tau_{-1} \quad (12)$$

### 3. Date experimentale

#### 3.1. Mașina de încercat la oboseală

Analiza experimentală a influenței solicitărilor variabile asupra rezistenței metalelor se face prin încercări de oboseală realizate în condiții de laborator, folosind epruvete cu forme și dimensiuni normalizate și supuse unor solicitări cunoscute, cu variație continuă.

Mașinile de încercat la oboseală trebuie să realizeze:

- variația solicitării, în timp, între limitele maximă și minimă după unul din tipurile de cicluri descrise anterior;
- modificarea tensiunilor  $\sigma_{\min}$  și  $\sigma_{\max}$  la schimbarea epruvetei;
- eventual, schimbarea coeficientului de asimetrie a ciclului de solicitare (pentru a realiza diferite încercări la oboseală).

În cadrul lucrării experimentele se efectuează pe o mașină pentru încercări de oboseală la încovoiere rotativă, marca MEFETRM (Ungaria).

Schema mașinii [4] este prezentată în figura 9.a cu următoarele elemente constructive: 1 – epruveta, 2 – cuplaj elastic, care face legătura cu motorul electric de acționare, 3 – rulment oscilant de încărcare, 4 – contragreutate, 5 – mandrina pentru prinderea epruvetei, 6 – greutăți de încărcare. Mașina de încercări la oboseală este prevăzută cu un conector de ture care înregistrează numărul de cicluri până la ruperea epruvetei. Mașina folosește epruvete de secțiune circulară pe două reazeme, în mișcare de rotație cu turăție constantă (2890 rot/min). Dimensiunile și abaterile epruvetelor sunt indicate în tabelul 2.

Sarcina constantă (produsă de greutăți) este de încovoiere pură realizată după schema de încărcare din figura 9.b.

**Tabelul 2** Dimensiuni și abateri limită pentru epruvete

Mărimea măsurată	Valoarea	Toleranță, mm
Diametrul $d$	10 mm	$\pm 0,050$
Raza de raccordare $r$	$3 \cdot d$	$\pm 0,5$
Ovalitatea în zona de solicitare maximă		0,040

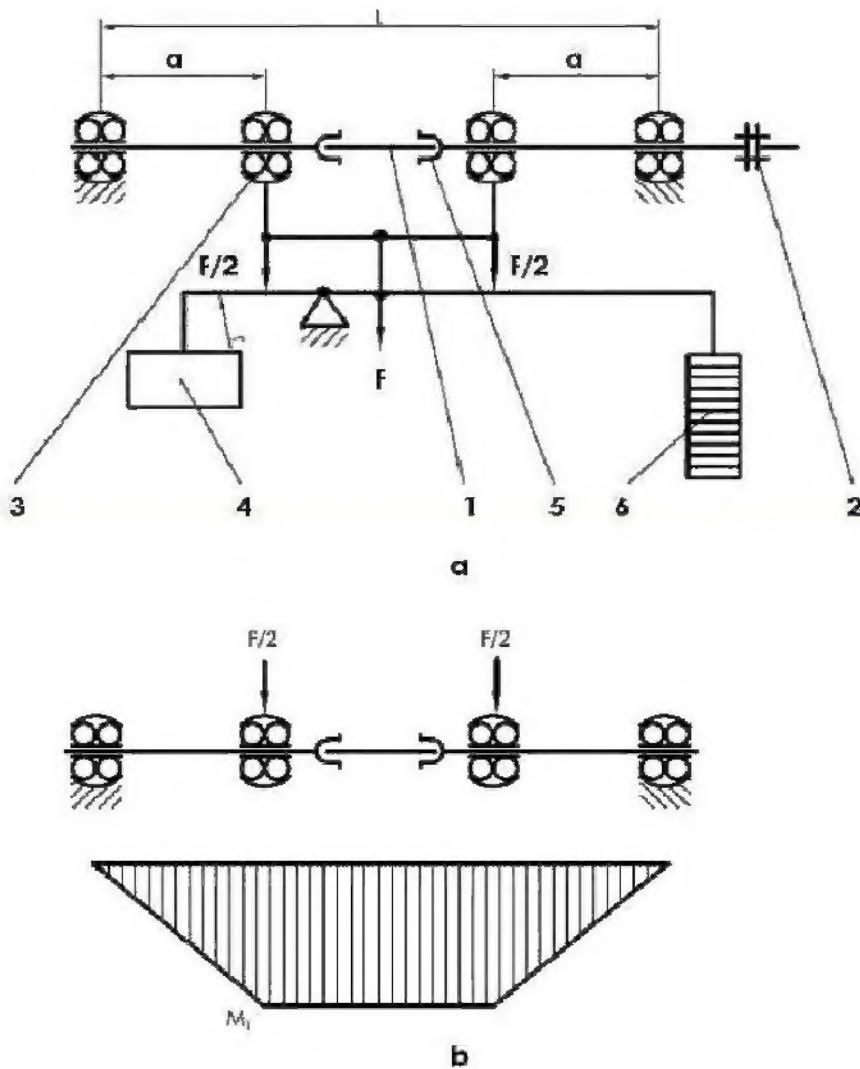


Fig. 9 Mașina pentru încercări de încovoiere rotativă

Pentru obținerea unor rezultate corecte (precizia mașinilor trebuie să se încadreze în clasa de precizie 1%) este necesar ca la montarea epruvelei să nu se depășească:

- abaterea maximă de la orizontalitate de 5 mm/m;
- bătaia radială maximă de  $\pm 0,013$  mm;
- abaterea maximă de la coaxialitate cu arborele motor de  $\pm 0,025$  mm.

Fixarea epruvelei pe toată durata încercării trebuie să fie fără alunecări. Numărarea ciclurilor de solicitare trebuie făcută cu o precizie de 200 cicluri și trebuie oprită automat în momentul ruperii epruvelei.

### 3.2. Procedura de efectuare a încercărilor

Metoda de determinare a limitei de rezistență la oboseală constă în trasarea, pe bază de date experimentale, a curbei Wöhler:

$$\sigma_{RN} = \sigma(N) \quad (13)$$

unde:  $\sigma_{RN}$  este tensiunea maximă la care se rupe epruveta, N este numărul de cicluri de solicitare corespunzător ruperii.

Pentru încercare (stabilirea comportării materialului la solicitare variabilă) sunt necesare un număr minim de 6 – 8 epruve, din același material, obținute prin același procedeu tehnologic, cu aceleași dimensiuni. Încercările trebuie efectuate pe aceeași mașină cu păstrarea condițiilor de încercare (sarcină, turatie).

Prima treaptă de solicitare se recomandă să fie:

- pentru oțeluri  $\sigma_{max} = 0,6 \cdot R_m$
- pentru aliaje neferoase  $\sigma_{max} = 0,4 \cdot R_m$

în care  $R_m$  este rezistența de rupere statică a materialului.

Repartizarea următoarelor trepte de solicitare se face astfel:

- în zona solicitărilor mari: treptele de tensiune să difere cu 30 – 60 MPa;
- în zona limitei de oboseală: treptele de tensiune să fie 10 – 20 MPa.

Se păstrează una sau două epruve ca rezervă pentru eventualele repetări ale încercărilor care au condus la puncte prea îndepărtate de curba medie.

Se continuă încercările la oboseală până când se ajunge ca cel puțin o epruvetă să nu se rupă. Numărul de cicluri  $N_0$  după care epruvele nu se mai rup poate avea valori între:

- $2 \cdot 10^6 - 2 \cdot 10^7$  pentru oțeluri;
- $2 \cdot 10^7 - 2 \cdot 10^8$  pentru aliaje ușoare.

În funcție de numărul de epruve disponibile se pot încerca, la fiecare treaptă de tensiune, una sau mai multe epruve.

### 3.3. Prelucrarea și Interpretarea rezultatelor experimentale

Întrucât încercările la oboseală sunt de durată a sute de ore, se vor folosi, pentru prelucrare și interpretare, date experimentale obținute prealabil (ANEXA 2 „Încercări de oboseală – rezultate experimentale”).

Pentru exemplificare s-au considerat epruvele din IC45 (OLC 45) normalizat (tabelul 3).

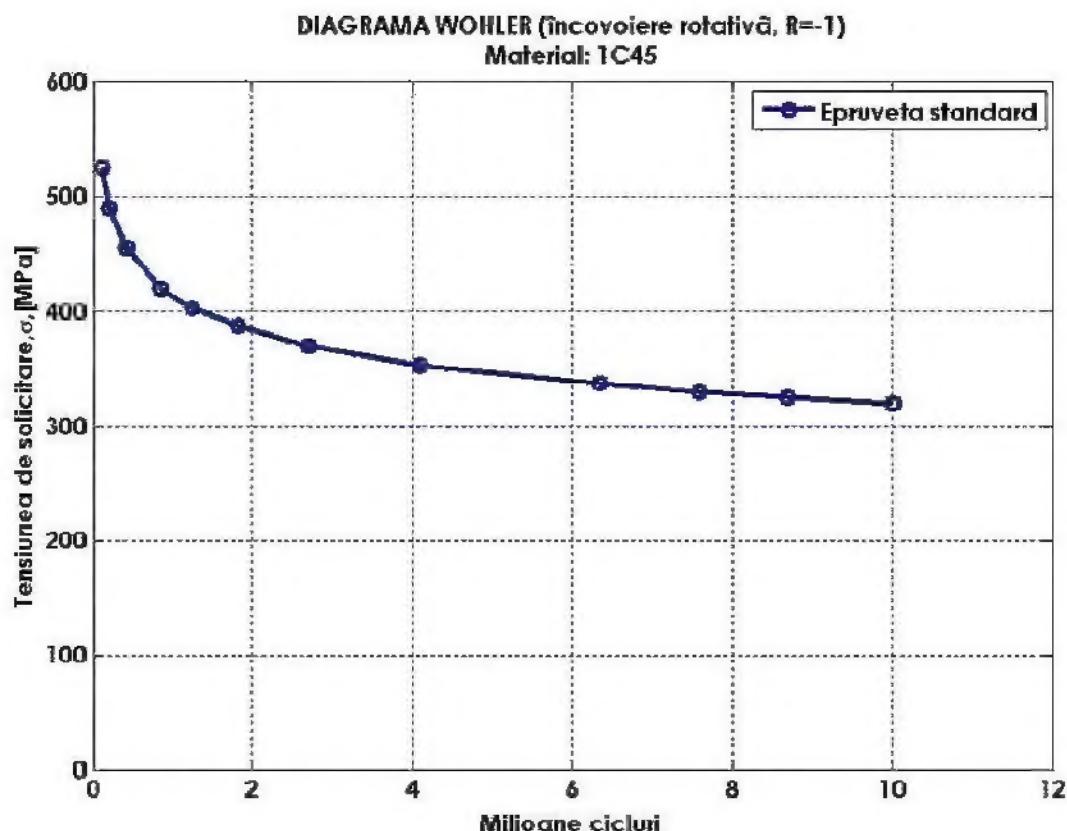
a) Utilizând softul MATLAB, [5], [6] se trasează curba de oboseală în coordonate rectangulare ( $N, \sigma_{RN}$ ) ca în figura 10 și se determină limita de rezistență la oboseală.

b) Se trasează curba de oboseală în coordonate dublu logaritmice ( $\lg N, \lg \sigma_{RN}$ ) ca în figura 11 și se determină exponentul  $m$  direct din grafic (panta) sau folosind relația (4).

Pe baza graficului obținut (figura 10) se determină limita de rezistență la oboseală a materialului 1C45 normalizat,  $\sigma_{-1} = 320$  MPa.

**Tabelul 3** Rezultate experimentale - Lotul 1 1C45 (OLC 45) normalizat

$\sigma_{IN}$ [MPa]	525	490	455	420	403	386	370	353	336	330	325	320
$N$ [ $10^6$ ]	0,11	0,21	0,42	0,86	1,24	1,82	2,70	4,09	6,33	7,58	8,69	10,0



**Fig. 10** Trasarea curbei de rezistență la oboseală (Wöhler)

DIAGRAMA WOHLER (încovolere rotativă, R=1)  
Material: 1C45

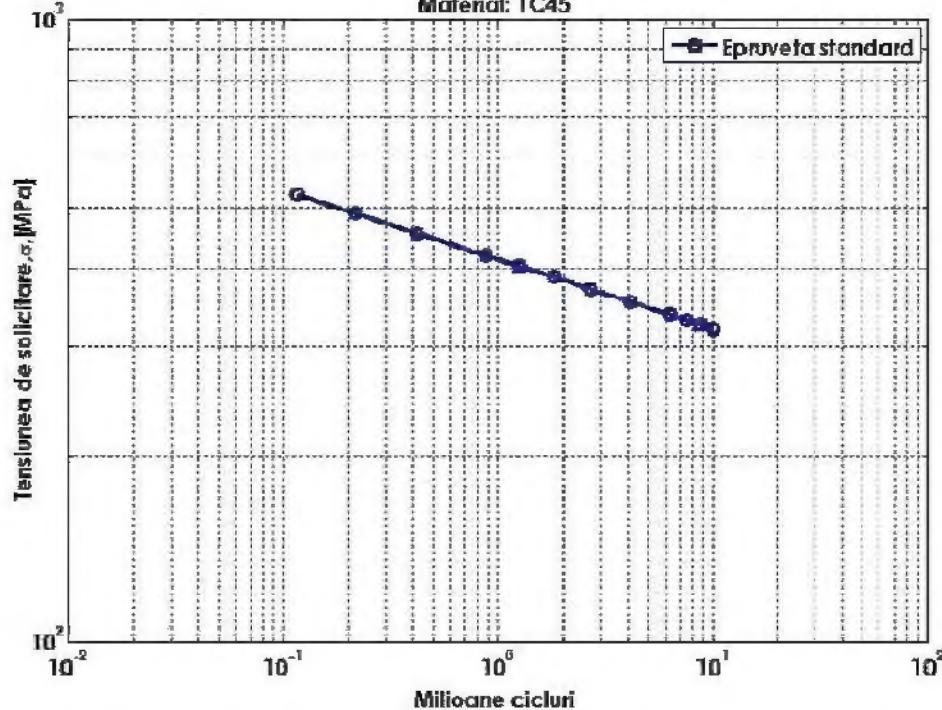


Fig. 11 Curba de rezistență la oboseală în coordonate logaritmice

Exponentul curbei Wöhler rezultă:

$$m = \frac{\log \frac{N_0}{N}}{\log \frac{\sigma_{-IN}}{\sigma_{-I}}} = \frac{\log \frac{10}{0.11}}{\log \frac{525}{320}} = 9.1 \quad (14)$$

### Bibliografie

1. Collins, J.A., 2003, *Mechanical Design of Machine Elements and Machines. A Failure Prevention Perspective*, John Wiley & Sons. Inc., USA.
2. Gafitanu, M., Crețu, S., Pavelescu, D., s.a., 1981, *Organe de mașini*, vol. I, Ed. Tehnică, București.
3. Rusu, O., Teodorescu, M., Lașcu-Simion, N., 1992, *Oboseala materialelor*, I, II, Ed. Tehnică, București.
4. Gafitanu, M., Crețu, S., Bariz, Gh., Olaru, D., Racocea, C., Hagi, Gh., Oancea, I., Știrbu, C., Ivănică, Grigoraș, S., 1985, *Organe de mașini. Îndrumar de laborator*, Rotaprint, Iași.
5. [http://www.mathworks.com/help/pdf\\_doc/matlab/getstart.pdf](http://www.mathworks.com/help/pdf_doc/matlab/getstart.pdf)
6. [http://www.mathworks.com/academia/student\\_center/tutorials/launchpad.html](http://www.mathworks.com/academia/student_center/tutorials/launchpad.html)